

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra Energetiky

**Vliv spoluspalování biomasy u kotle spalujícího uhlí na provozní
vlastnosti a parametry**

**Effect of biomass co-firing in coal fired boiler for operating properties
and parameters**

Student:

Josef Bárta

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Josef Bárta**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: **Vliv spoluspalování biomasy u kotle spalujícího uhlí na provozní vlastnosti a parametry**
Effect of Biomass Co-firing in Coal Fired Boiler for Operating Properties and Parameters

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši zaměřenou na kotle s roštovým ohništěm se spoluspalováním biomasy.
2. Navrhněte výpočtové schéma kotle.
3. Stanovte stechiometrii, výrobní teplo, účinnost a spotřebu paliva při spalování uhlí.
4. Stanovte stechiometrii, výrobní teplo, účinnost a spotřebu paliva při spoluspalování biomasy.
5. Proveďte analýzu řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:


VILIMEC, L. *Řízení a regulace energetických zařízení*. Skripta VŠB TU Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1853-5.
DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Skripta ČVUT Praha, 1999. ISBN 80-0102035-5.
www.fs.vsb.cz/euprojekty/414

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21.5.2012

podpis studenta Břet. J. J.

Prohlašuji, že

- *Jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 školní dílo*
- *beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).*
- *souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.*
- *bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).*
- *beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.*

V Ostravě dne 21.5.2012.....

podpis studenta Josef Bárta.....

Jméno a příjmení autora práce:

Josef Bárta

Adresa trvalého pobytu autora práce :

Perunská 38, Hodonín 695 04

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BÁRTA, J. Vliv spoluspalování biomasy u kotle spalujícího uhlí na provozní vlastnosti a parametry. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky 2012, 53 stran, Vedoucí práce: Vilimec, L.

Bakalářská práce se zabývá spoluspalováním černého uhlí, jakožto tradičního zdroje energie v ČR společně s dřevní štěpkou. V úvodu práce stručně popisují vlastnosti biomasy, druhy dř. štěpky a ohniště vhodná pro spalování. Následuje výpočtová část s uhelným a výpočtovým schématem, výpočet stechiometrie pro černé uhlí, pro dř. štěpku a dále pro směs obou paliv v určitých podílových poměrech. Po výpočtech následuje cíl bakalářské práce a to srovnání dosažených výsledků a se stručným popisem jejich vlivů.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BÁRTA, J. Effect of biomass co – firing in coal fired boiler for operating prperties and parameters. Ostrava : VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetics, 2010, 53 pages, Thesis head: Vilimec, L.

This bachelor thesis deals with the co – firing of coal as a traditional source of energy in Czech Republic together with woodchips. The introduction shortly describes the properties of biomass, types of woodchips and fireplaces suitable for burning. An analysis part with schemes for coal and calculation follows, including calculations of stoichiometry for coal, woodchips and a mixture of both fuels in a certain ratio. The main objective of this bachelor thesis follows, which is a comparison of achieved results with a brief description of their effects.

Obsah:

Přehled veličin:	8
Výpočtové parametry:	10
1. Úvod	11
2. Biomasa v energetice	12
2.1 Vlastnosti biomasy	12
2.2 Dřevní štěrka	14
2.3 Koloběh CO ₂ u biomasy.....	14
2.4 Základní faktory ovlivňující spalování pevných biopaliv.....	15
3. Ohniště pro spalování uhlí a biomasy	16
3.1 Fluidní ohniště	16
3.2 Roštová ohniště	17
4. Výpočty kotle a stechiometrické výpočty paliv	18
4.1 Stanovení výrobního tepla.....	20
4.2 Výpočty pro černé uhlí	20
4.2.1 Stechiometrické výpočty.....	20
4.2.2 Stanovení měrných tepelných kapacit spalín.....	25
4.2.3 Tepelné ztráty.....	25
4.2.4 Stanovení účinnosti	28
4.2.5 Množství přivedeného paliva	28
4.3 Výpočty pro dřevní štěrku.....	29
4.3.1 Stechiometrické výpočty.....	29
4.3.2 Stanovení měrných tepelných kapacit spalín.....	33
4.3.3 Tepelné ztráty.....	34
4.3.4 Stanovení účinnosti	35
4.3.5 Množství přivedeného paliva	35
5. Výpočty pro spoluspalování směsí paliv	36
5.1 Výpočet pro směs paliva 80% č. uhlí a 20% dř. štěrky	36
5.2 Výpočet pro směs paliva 70% č. uhlí a 30% dř. štěrky	38
5.3 Výpočet pro směs paliva 60% č. uhlí a 40% dř. štěrky	39
5.4 Výpočet množství spalovacích vzduchů a množství spalín pro paliva a směsi	41
6. Analýza výsledků	43
6.1 Porovnání změny výhřevnosti při spoluspalování.....	43
6.2 Porovnání změny objemu spalovacího vzduchu a spalín.....	44

6.3	<i>Porovnání změn objemu složek spalin</i>	46
6.4	<i>Porovnání změny komínové ztráty a účinnosti.....</i>	49
6.5	<i>Porovnání spotřeby přivedeného paliva</i>	50
7.	Závěr	52
	Seznam použité literatury	53

Přehled veličin:

A'	[%]	Procento popeloviny v surovém vzorku paliva
C_S	[1]	Součinitel spalitelných zbytků
c_{pCO_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého
c_{pH_2O}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita vodní páry
c_{pN_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita dusíku
c_{pO_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita kyslíku
c_{pSO_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita popílku
c_{psp}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita spalín
i_{NV}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie napájecí vody
i_{OD}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie odluhu
i_{PP}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie přehřáté páry
M_{PAL}	$[kg \cdot s^{-1}]$	Množství přivedeného paliva
M_{PV}	$[kg \cdot s^{-1}]$	Množství spáleného paliva
\dot{m}_{nv}	$[t \cdot h^{-1}]$	Hmotnostní průtok napájecí vody
\dot{m}_{od}	$[t \cdot h^{-1}]$	Hmotnostní průtok v odluhu
\dot{m}_{pp}	$[t \cdot h^{-1}]$	Hmotnostní průtok přehřáté páry
P_{NV}	[Mpa]	Tlak napájecí vody
P_{OD}	[Mpa]	Tlak v odluhu
P_{PP}	[MPa]	Tlak přehřáté páry
Q_{VYR}	[MW]	Výrobní teplo
Q_{i1}	$[MJ \cdot kg^{-1}]$	Výhřevnost černého uhlí
Q_{i2}	$[MJ \cdot kg^{-1}]$	Výhřevnost dřevní štěpky
t_{NV}	[°C]	Teplota napájecí vody
t_O	[°C]	Teplota okolí
t_{OD}	[°C]	Teplota v odluhu
t_{PP}	[°C]	Teplota přehřáté páry
t_S	[°C]	Teplota spalín

V_{CO_2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	<i>Měrný objem oxidu uhličitého</i>
V_{H_2O}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	<i>Měrný objem vody ve spalínách</i>
V_{O_2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	<i>Měrný objem kyslíku</i>
V_{O_2min}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	<i>Minimální měrný objem spalovacího kyslíku</i>
V_{SO_2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	<i>Měrný objem oxidu siřičitého</i>
V_{SS}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	<i>Měrný objem suchých spalín</i>
V_{SV}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	<i>Měrný objem vlhkých spalín</i>
V_{VZS}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	<i>Skutečný měrný objem suchého spalovacího vzduchu</i>
V_{VZV}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	<i>Skutečný měrný objem vlhkého spalovacího vzduchu</i>
X_S	[1]	<i>Podíl popela v nedopalu</i>
Z_C	[%]	<i>Ztráta nedopalem</i>
Z_{Cpop}	[%]	<i>Ztráta nedopalem v propadu</i>
Z_{Cstr}	[%]	<i>Ztráta nedopalem ve strusce</i>
Z_F	[%]	<i>Ztráta fyzickým teplem</i>
Z_{Fstr}	[%]	<i>Ztráta fyzickým teplem ve strusce</i>
Z_{Fpop}	[%]	<i>Ztráta fyzickým teplem v propadu</i>
Z_K	[%]	<i>Komínová ztráta</i>
n	[1]	<i>Součinitel přebytku vzduchu</i>
η	[%]	<i>Účinnost kotle</i>
ω_{CO_2}	[%]	<i>Koncentrace oxidu uhličitého ve spalínách</i>
ω_{H_2O}	[%]	<i>Koncentrace vody ve spalínách</i>
ω_{N_2}	[%]	<i>Koncentrace dusíku ve spalínách</i>
ω_{O_2}	[%]	<i>Koncentrace kyslíku ve spalínách</i>
ω_{SO_2}	[%]	<i>Koncentrace oxidu siřičitého ve spalínách</i>

Výpočtové parametry:

Prvkový rozbor černého uhlí(Polsko), surového vzorku (hmotnostně) „r“

$$C^r = 53,9 \text{ [\%]} \quad H^r = 3,2 \text{ [\%]} \quad S^r = 3,2 \text{ [\%]}$$

$$N^r = 0,85 \text{ [\%]} \quad O_2^r = 4,37 \text{ [\%]} \quad W^r = 10,1 \text{ [\%]}$$

$$A^r = 24,9 \text{ [\%]}$$

Výhřevnost:

$$Q_i^r = 20,25 \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Prvkový rozbor dřevní štěpky, hořlavina (hmotnostně) „h“

$$C^h = 50 \text{ [\%]} \quad H^h = 6,2 \text{ [\%]} \quad S^h = 0 \text{ [\%]}$$

$$N^h = 0,2 \text{ [\%]} \quad O_2^h = 43,6 \text{ [\%]} \quad Cl^h = 0,02 \text{ [\%]}$$

$$W^r = 42,53 \text{ [\%]} \quad A^r = 2,67 \text{ [\%]}$$

Výhřevnost:

$$Q_i^r = 9,39 \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Napájecí Voda

$$t_{NV} = 145 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$p_{NV} = 4,2 \text{ [MPa]}$$

Přehřátá pára

$$t_{PP} = 445 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$p_{NV} = 3,65 \text{ [MPa]}$$

Odluh

$$\delta = 3 \text{ [\%]}$$

Parní výkon

$$\dot{m}_p = 45 \text{ [t} \cdot \text{h}^{-1}\text{]}$$

Přebytek vzduchu

$$n = 1,8$$

Teplota spalin za kotlem $t_s=220 \text{ }^\circ\text{C}$

Podíl spalované štěpky pro 20%, 30%, a 40%

1. Úvod

V této bakalářské práci se zabývám spalováním dřevní štěpky s černým uhlím v roštovém kotli a vlivu takového spalování na provozní vlastnosti a parametry. Přičemž tato práce stručně ukazuje několik poznatků o biomase, druzích kotlů, dřevní štěpky a také čím je pro nás spalování biomasy s tradičním uhlím přínosem. Dále zpracovávám stechiometrické výpočty pro obě paliva, jejich spotřebu, účinnosti a tepelné ztráty, porovnávám produkci jednotlivých složek spalin, jejich objemy a změny účinnosti při jejich spalování a spalování.

2. Biomasa v energetice

Biomasa se považuje za jeden z nejperspektivnějších druhů obnovitelných zdrojů energie. Jedná se o zdroj rostlinného, nebo živočišného původu, ať už ve formě odpadů ze zemědělské produkce, těžby dřeva, průmyslu aj. V poslední době se stále více rozšiřuje intenzivní pěstování biomasy jakožto energetické suroviny. Bohužel v této otázce se najde několik důvodů proti takovému pěstování, ale to není předmětem této práce. Protože přeprava a svoz biomasy na velké vzdálenosti je nákladná, je nutno uvažovat nad ekonomicky přijatelnou vzdáleností zisku paliva – řádově se jedná o desítky kilometrů a také nad lokální využitelností biomasy.

2.1 Vlastnosti biomasy

Pro energetické využití biopaliv nás zajímají zejména následující vlastnosti:

-zrnitost, popřípadě forma a tvar částic a měrná hmotnost

-výhřevnost

-charakteristika hrubého rozboru, což je vlhkost, obsah a vlastnosti popela, obsah prchavé hořlaviny

-chemické složení, tzv. prvkový rozbor

Vlastnosti biomasy se navzájem mohou lišit a jsou závislé na zeměpisné poloze, odrůdě, klimatických a půdních podmínkách, způsobu pěstování, stupni znečištění okolí, příměsemi atd.

Výhody	Nevýhody
všeobecná dostupnost (tuzemský zdroj)	nižší výhřevnost než u konvenčních paliv
poměrně nízká cena biomasy, růst pracovních míst	potřeba skladovacích prostor
využití odpadu (zbytek po spalování lze využít jako hnojivo)	větší rozměry kotle a příslušenství
uzavřený cyklus CO ₂	velký vliv vlhkosti na spalovací procesy
využití půdy nevhodné pro pěstování potravinářských plodin	složitější manipulace v porovnání s ostatními palivy
možnost dotační podpory	ekonomicky únosná vzdálenost zisku paliva

Tab. 2-1 Přehled kladů a záporů biopaliv.

Jednou z nejdůležitějších vlastností paliv je výhřevnost – tzn. teplo, které se uvolní dokonalým spálením jednotkového množství paliva. Výhřevnost biomasy v tzv. sušině se

často blíží hodnotám hnědého uhlí ($18\text{--}20 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), avšak zásadně se liší podílem vody v palivu. Výhřevnost závisí například na způsobu uskladnění, jedná-li se o surový stav paliva, stav po sušení atd. Obsah vody se u dřevitých materiálů pohybuje v rozsahu 20% u sušených, až po 65% u surových.

Druh paliva	Obsah vody [%]	Výhřevnost [MJ/kg]
Listnaté dřevo	15	14,605
Jehličnaté dřevo	15	15,584
borovice	20	18,4
vrba	20	16,9
olše	20	16,7
habr	20	16,7
akát	20	16,3
dub	20	15,9
jedle	20	15,9
jasan	20	15,7
buk	20	15,5
smrk	20	15,3
bříza	20	15,0
modřín	20	15,0
topol	20	12,9
Dřevní štěpka	30	12,18
Sláma obilovin	10	15,49
Sláma kukuřice	10	14,40
Lněné stonky	10	16,90
Sláma řepky	10	16,00

Tab. 2-2 Přehled výhřevností některých rostlinných paliv [2]

Vlhkost dřevařská	%	0	13	25	42	67	100	150	190
Vlhkost energetická	%	0	10	20	30	40	50	60	65
Výhřevnost smrkové kůry	kJ/kg	17417	15323	13230	11304	9294	7326	5233	4270
Výhřevnost smrkových pilin	kJ/kg	17919	15700	13690	11723	9713	7661	5652	4689
Sypná hmotnost	prms								
Smrkové piliny	kg/m ³	0	0	210	227	260	350	443	-
Hoblíny	kg/m ³	65	80	100	122	150	180	215	232
Drcená smrk.kůra	kg/m ³	188	203	223	246	271	300	333	352
Měrná hmotnost	plm								
Smrkové dřevo	kg/m ³	440	475	520	570	670	804	-	-
Smrková kůra	kg/m ³	615	629	647	670	697	727	760	780

Tab. 2-3 Srovnání různých druhů biopaliv z pohledu dřevařské a energetické vlhkosti [7]

Vlhkost dřeva se vyjadřuje jako hmotnostní procento vody k celkové hmotnosti vlhkého dřeva. V dřevařském průmyslu se tato vlhkost vyjadřuje jako hmotnostní procento vody k hmotnosti suchého dřeva, proto může dojít k nezvyklým vlhkostem nad 100% (viz. tab. 2-3)

2.2 Dřevní štěpka

Dřevní štěpka je strojně nakrácená a nadrcená dřevní hmota. Získává se z odpadů lesní těžby a průmyslového zpracování dřeva, nebo z rychle rostoucích dřevin. Jedná se o velmi levné biopalivo určené pro vytápění rodinných domů, nebo jako palivo pro energetické účely. Podle kvality štěpky a jejích příměsí ji můžeme dělit na štěpku zelenou, hnědou a bílou.

Zelená štěpka(lesní)

Štěpka získaná ze zbytků po lesní těžbě, která obsahuje části drobných větví, listů, případně jehličí a má poměrně vysokou vlhkost.

Hnědá štěpka

Štěpka získaná ze zbytkových částí kmenů, pilařských odřezků apod., obsahuje však kůru. Používá se pro energetické účely.

Bílá štěpka

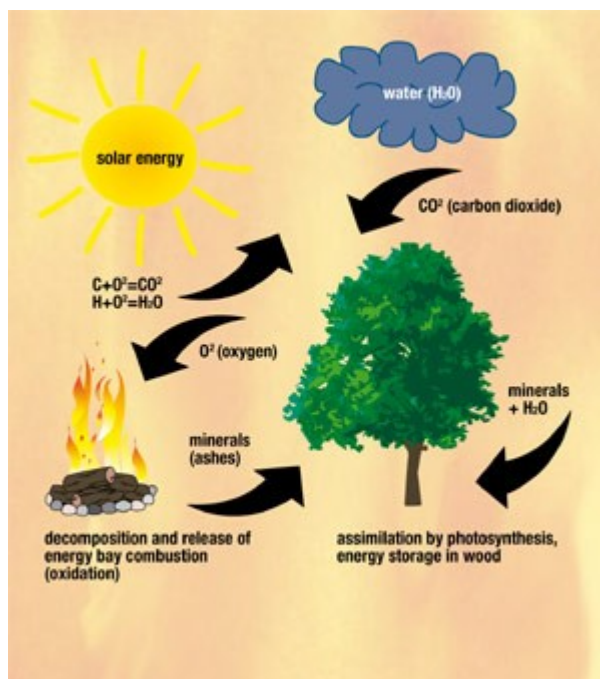
Štěpka získaná z odkorněného dříví. Pro spalování se téměř nevyužívá.



Obr. 2-1 Dřevní štěpka vyrobená pomocí štěpkovače a pomocí drtiče. [2]

2.3 Koloběh CO₂ u biomasy

Při spalování biomasy vzniká oxid uhličitý, suché spaliny ho mohou teoreticky obsahovat až 20%, podle teorií a výzkumů se však při růstu nové biomasy spotřebuje stejné množství oxidu uhličitého, jako při jejím spalování, takže takto „získaný“ oxid uhličitý nezatěžuje životní prostředí a nepřispívá ke skleníkovému efektu.



Obr. 2-2 Koloběh CO₂ [6]

2.4 Základní faktory ovlivňující spalování pevných biopaliv

- Spalné teplo a výhřevnost je nižší, než u většiny fosilních paliv.
- Chemické složení podmiňuje produkci těkavých látek při teplotě přes 200°C v daleko větším podílu, než u uhlí nebo koksu.
- Zanedbatelný obsah síry způsobuje značné snížení teploty rosného bodu.
- Při spálení vzniká malé množství popele, který s ohledem na vysoký obsah draslíku a křemíku zejména u kůry a stébelné biomasy má nižší teploty tavení.
- Množství popele je malé, většinou je lehký a velká část je odnesena spalinami.
- Vysoký obsah těkavých látek podmiňuje vznik delších plamenů, prodlužování doby hoření, možnosti vzniku sazí, dehtů a kyselin při nedokonalém spalování.
- Teplota hoření nesmí klesnout pod 600°C, jinak těkavé látky neprohořívají a vytváří se dým.

3. Ohniště pro spalování uhlí a biomasy

Základní typy ohnišť

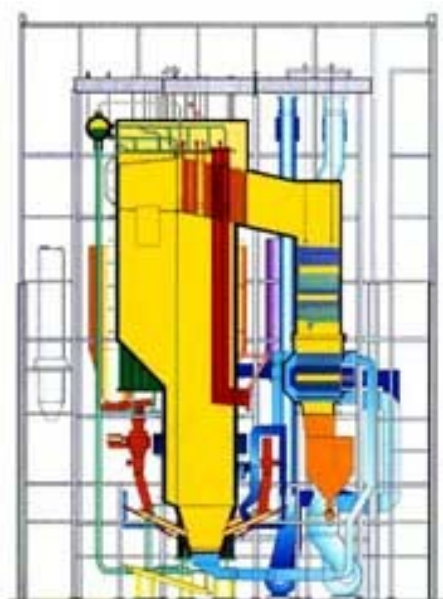
- Ohniště prášková
- Ohniště granulační, výtavná
- Ohniště fluidní
- Ohniště roštová

Z hlediska posuzování vlivu uhlí a biomasy při spoluspalování připadají v úvahu zejména ohniště roštová a fluidní.

3.1 Fluidní ohniště

Ve fluidním ohništi se spaluje drcené palivo v cirkulující fluidní vrstvě, kde dochází k intenzivnímu kinetickému hoření. Dochází také k dobrému rozvrstvení paliva podle zrnitosti a dlouhému setrvání ve fluidní vrstvě až k dokonalému vyhoření.

Tato ohniště jsou vhodná ke spalování méněhodnotných paliv, včetně odpadů z biomasy. Ve fluidní vrstvě se udržuje poměrně nízká teplota spalování 700°C-900°C, což vede k nižší tvorbě emisí Nox. Hlavní nevýhodou fluidních ohnišť je značná složitost a náročnost na obsluhu a údržbu. Pro malé kotle jsou pořizovací a provozní náklady většinou neúnosné a dává se přednost spalování na roštu.



Obr. 3-1 Příklad fluidního ohniště [2]

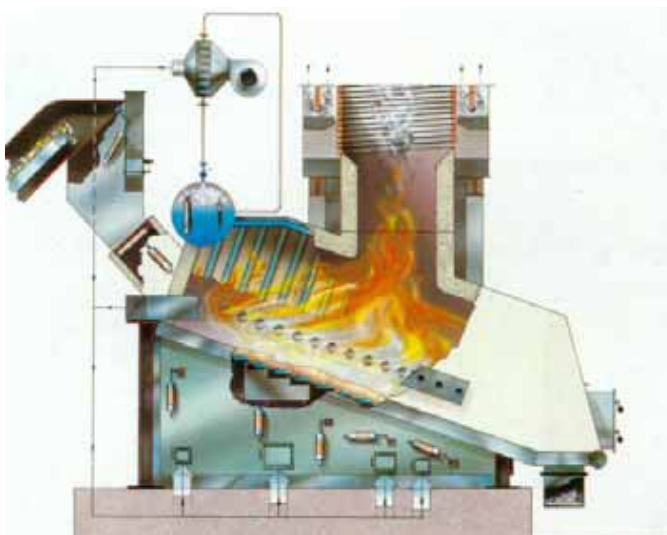
3.2 Roštová ohniště

Jsou nejstarším a takřka nepoužívanějším typem, jsou určena pro spalování kusových paliv. V hořící vrstvě dochází k intenzivnímu kinetickému spalování, uvolněná prchavá hořlavina dohořívá v prostoru spalovací komory a drobné částice hoří ve vzhledu proudů spalin a vzduchu.

Rošt má plnit při spalování tyto základní funkce:

- podpírat palivo
- zajistit přívod spalovacího vzduchu do jednotlivých míst hoření
- umožnit vysušení paliva, zahřátí a zapálení, hoření a dokonalé vyhoření
- shromažďovat tuhé zbytky, popř. zajistit jejich odvod
- umožnit regulaci výkonu

Existuje celá řada různých druhů roštových ohnišť, kde se dají spalovat paliva od zrnitých s velkým prachovým podílem, přes kusová paliva, až po spalování velkých předmětů, jako jsou polena a špalky. Spalování v roštových ohništích je nejrozšířenější způsob energetického využití biomasy. pro spalování je také nutný větší přebytek vzduchu, což vede k vyšší komínové ztrátě.



Obr. 3-2 Příklad roštového ohniště [2]

4. Výpočty kotle a stechiometrické výpočty paliv

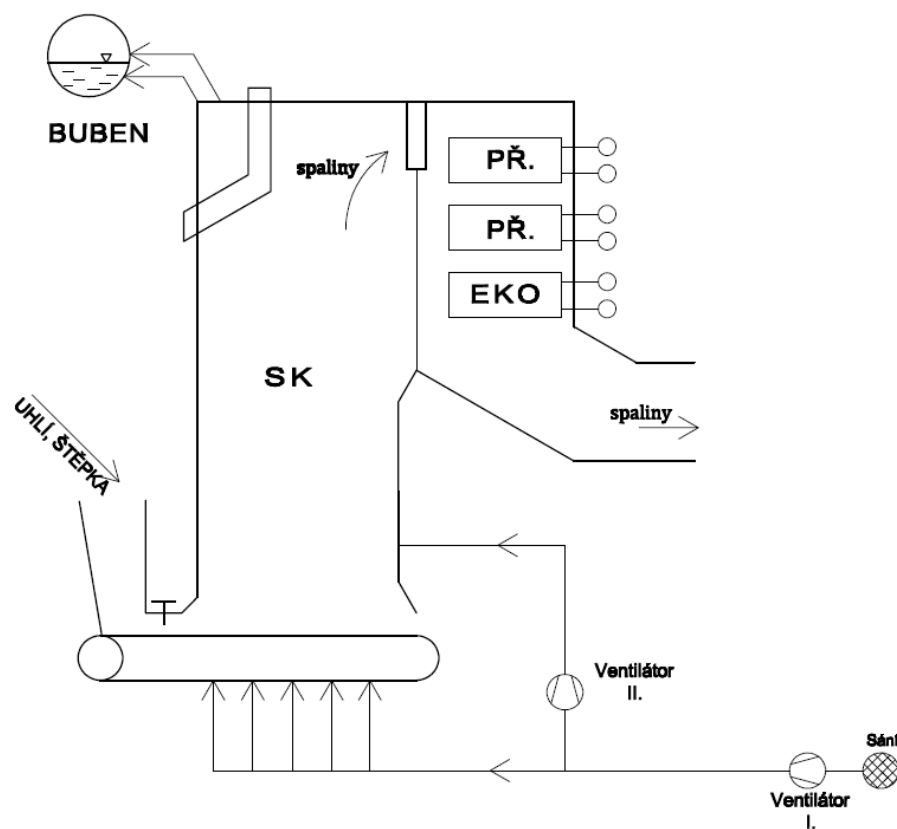
Tento text i výpočty jsou zpracovány na základě literatury [1].

Na základě stechiometrických výpočtů můžeme stanovit objem vzduchu potřebného pro spálení jednotkového množství paliva a objem spalin, které vzniknou při spalování, jedná se tedy o objemové výpočty. Vychází se ze stechiometrických spalovacích rovnic. Rozlišujeme dva základní modely:

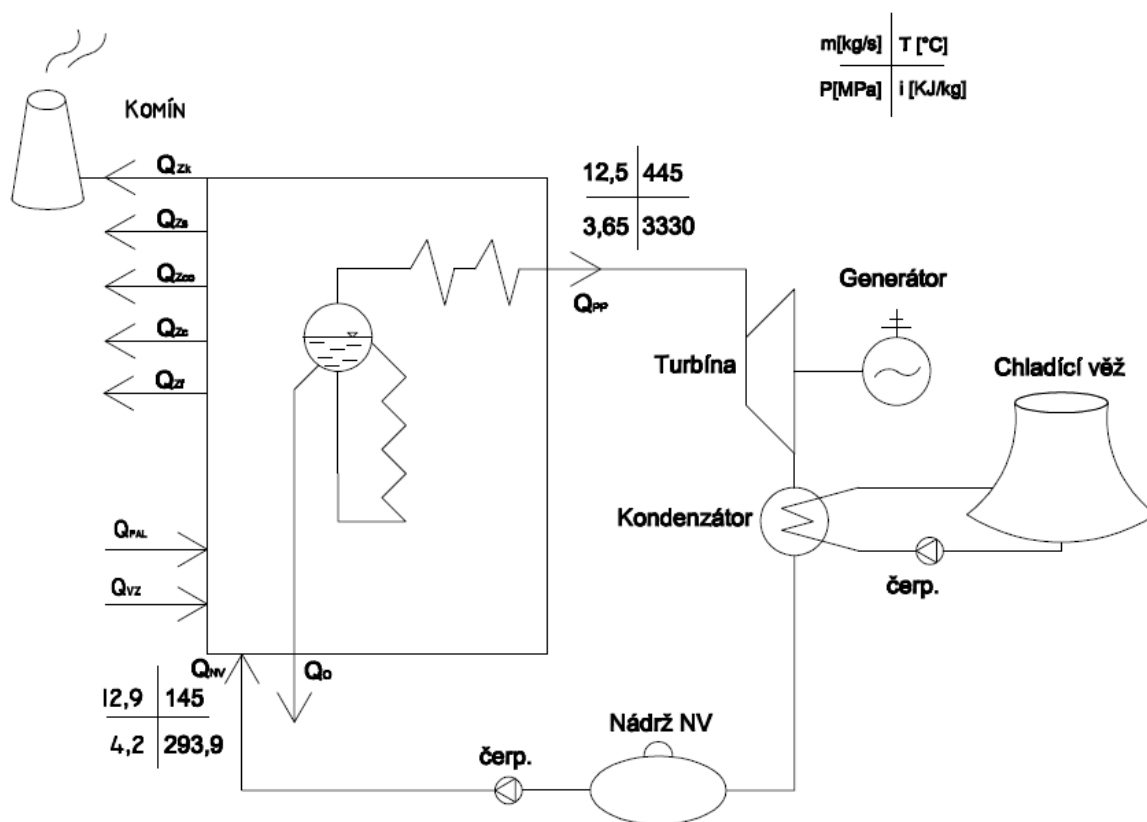
- *Model dokonalého spalování*
- *Model nedokonalého spalování*

V této bakalářské práci počítám s modelem dokonalého spalování. K hoření tedy dojde při přebytku vzduchu větším než 1 a takřka veškerá hořlavina obsažená v palivu se účastní spalovacího procesu.

Při stechiometrických výpočtech se vychází ze složení paliva v hmotnostních podílech pro původní (tzv. surový „r“) stav. Vypočtené objemy se označují jako minimální a obvykle se vyjadřují v m^3_N (metr krychlový normální pro $T_n=273,15\text{K}$, $p_n=101,325\text{kPa}$) na 1kg paliva pro stavy suché a vlhké.



Obr. 4-1 Uhlé schéma kotle



Obr. 4-2 Výpočtové schéma kotle

4.1 Stanovení výrobního tepla

Entalpie páry

$i_{PP} = 3330 [kJ \cdot kg^{-1}]$ - odečteno z mollierova diagramu vodní páry

Entalpie odluhu

$i'_{OD} = 2801 [kJ \cdot kg^{-1}]$ – z tab. 14 z literatury[3]

Výpočet entalpie napájecí vody

Měrné tepelné kapacity napájecí vody z tab. 4.9. z literatury [1]

$$c_p(140^\circ\text{C}, 4,2\text{MPa}) = (1,984 - 4,272) \cdot \frac{4,2}{5} + 4,272 = 2,350 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$c_p(160^\circ\text{C}, 4,2\text{MPa}) = (1,977 - 4,323) \cdot \frac{4,2}{5} + 4,323 = 2,352 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{pNV}(145^\circ\text{C}, 4,2\text{MPa}) = (2,350 - 2,352) \cdot \frac{5}{20} + 2,352 = 2,351 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$i_{NV} = c_p \cdot \Delta t = 2,351 \cdot (145 - 20) = 293,875 [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výrobní teplo

$$Q_{vyr} = M_p \cdot (i_p - i_{NV}) + M_o \cdot (i' - i_{NV}) [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.1.})$$

$$Q_{vyr} = \frac{45000}{3600} \cdot (3330 - 293,875) + 0,03 \cdot 12,5 \cdot (2801 - 293,875)$$

$$Q_{vyr} = 38,892 [MW]$$

4.2 Výpočty pro černé uhlí

4.2.1 Stechiometrické výpočty

Minimální objem kyslíku potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{O_2,min} = 22,4 \cdot \left(\frac{C^r}{12} + \frac{H^r}{4} + \frac{S^r}{32} - \frac{O^r}{32} \right) [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.2.})$$

$$V_{O_2,min} = 22,4 \cdot \left(\frac{0,539}{12} + \frac{0,032}{4} + \frac{0,0067}{32} - \frac{0,0437}{32} \right)$$

$$V_{O_2,min} = 1,1594 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objemové složení suchého vzduchu (Obr 4-3), který je zahrnut ve výpočtech. Neuvažuji tedy s podílem oxidu uhličitého a dále s podílem vzácných plynů v nasávaném ovzduší, jako je například argon, xenon aj.



Obr. 4-3 Uvažované objemové složení atmosférického vzduchu.

Minimální objem suchého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{VZS,min} = \frac{V_{O_2,min}}{0,21} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.3.})$$

$$V_{VZS,min} = \frac{1,1594}{0,21}$$

$$V_{VZS,min} = 5,5209 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Při stechiometrických výpočtech pro běžné klimatické podmínky je možno volit velikost $v = 1,016$ která přibližně odpovídá vlhkosti $\varphi = 70[\%]$ při teplotě $t_0 = 20[^\circ C]$

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{VZV,min} = v \cdot V_{VZS,min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.4.})$$

$$V_{VZV,min} = 1,016 \cdot 5,5209$$

$$V_{VZV,min} = 5,6092 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem vzduchu skutečného suchého

$$V_{VZS} = n \cdot V_{VZS,min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.5.})$$

$$V_{VZS} = 1,8 \cdot 5,5209$$

$$V_{VZS} = 9,9376 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem vzduchu skutečného vlhkého

$$V_{VZV} = n \cdot V_{VZV,min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.6.})$$

$$V_{VZV} = 1,8 \cdot 5,6092$$

$$V_{VZV} = 10,0965 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem spalín získáme při dokonalém spálení 1kg paliva s množstvím přebytku vzduchu, objem suchých spalín je pak součtem všech plynných složek spalín.

Objem oxidu uhličitého

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot C^r [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.7.})$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,539$$

$$V_{CO_2} = 1,0061 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem oxidu siřičitého

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S^r [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.8.})$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot 0,0067$$

$$V_{SO_2} = 0,0047 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem dusíku

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot N^r + 0,79 \cdot V_{VZS} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.9.})$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot 0,0085 + 0,79 \cdot 9,9376$$

$$V_{N_2} = 7,8575 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem kyslíku

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{VZS,min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.10.})$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (1,8 - 1) \cdot 5,5209$$

$$V_{O_2} = 0,9275 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem suchých spalin

$$V_{SS} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.11.})$$

$$V_{SS} = 1,0061 + 0,0047 + 7,8575 + 0,9275$$

$$V_{SS} = 9,7958 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem vodní páry, ze spalování vodíku, odpařenou vlhkostí paliva a vlhkostí vzduchu

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot H^r + \frac{22,4}{18} \cdot W^r + (\vartheta - 1) \cdot V_{VZS} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.12.})$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot 0,032 + \frac{22,4}{18} \cdot 0,101 + (1,016 - 1) \cdot 9,9376$$

$$V_{H_2O} = 0,6431 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem vlhkých spalin z 1kg paliva tedy bude

$$V_{SV} = V_{SS} + V_{H_2O} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.13.})$$

$$V_{SV} = 9,7958 + 0,6431$$

$$V_{SV} = 10,4389 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Procentní složení spalín

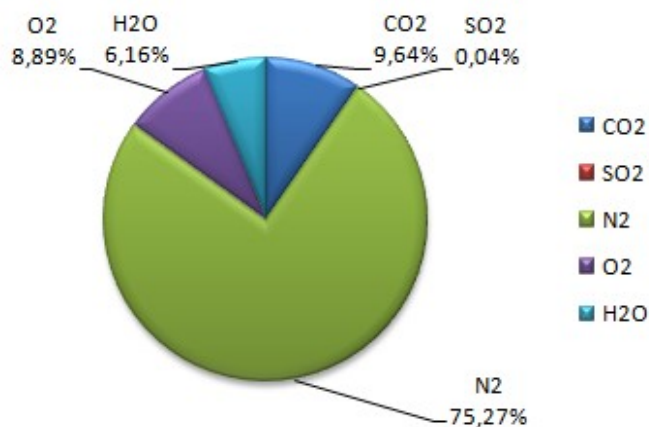
$$\omega_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{1,00613}{10,43807} \cdot 100 = 9,6390[\%] \quad (\text{rovnice 4.14.})$$

$$\omega_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{0,00469}{10,43807} \cdot 100 = 0,0449[\%] \quad (\text{rovnice 4.15.})$$

$$\omega_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{7,85665}{10,43807} \cdot 100 = 75,2691[\%] \quad (\text{rovnice 4.16.})$$

$$\omega_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{0,92751}{10,43807} \cdot 100 = 8,8858[\%] \quad (\text{rovnice 4.17.})$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{0,64309}{10,43807} \cdot 100 = 6,1610[\%] \quad (\text{rovnice 4.18.})$$



Graf 4-1 Objemové složení spalín u černého uhlí

Objem spalín z 1kg paliva při teplotě $t_s=220^\circ\text{C}$ s přebytkem vzduchu $n = 1,8$

$$V_{SV}^{t_s} = V_{SV} \cdot \frac{273,15+t_{s2}}{273,15} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.19.})$$

$$V_{SV}^{t_s} = 10,4381 \cdot \frac{273,15 + 220}{273,15}$$

$$V_{SV}^{t_s} = 18,8450 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

4.2.2 Stanovení měrných tepelných kapacit spalin

*K určení měrných tepelných kapacit spalin, jsem použil Tab. 4.9 z literatury [1].
K přesnějšímu výpočtu pro teplotu 220°C jsem použil interpolační metodu.*

$$c_{pCO_2} = \frac{1,8626 - 1,7863}{300 - 200} \cdot (220 - 200) + 1,7863 = 1,8015 [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{pSO_2} = \frac{2,0010 - 1,9427}{300 - 200} \cdot (220 - 200) + 1,9427 = 1,9543 [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{pO_2} = \frac{1,3567 - 1,3372}{300 - 200} \cdot (220 - 200) + 1,3372 = 1,3411 [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{pN_2} = \frac{1,3069 - 1,2994}{300 - 200} \cdot (220 - 200) + 1,2994 = 1,3009 [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{pH_2O} = \frac{1,5425 - 1,5227}{300 - 200} \cdot (220 - 200) + 1,5227 = 1,5266 [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{psp} = c_{pCO_2} \cdot \omega_{CO_2} + c_{pSO_2} \cdot \omega_{SO_2} + c_{pO_2} \cdot \omega_{O_2} + c_{pN_2} \cdot \omega_{N_2} + c_{pH_2O} \cdot \omega_{H_2O}$$

(rovnice 4.20.)

$$c_{psp} = 1,8015 \cdot 0,096390 + 1,9543 \cdot 0,000449 + 1,3411 \cdot 0,08858 + 1,3009 \cdot 0,752691 + 1,5266 \cdot 0,061610$$

$$c_{psp} = 1,3665 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

4.2.3 Tepelné ztráty

Ztráta mechanickým nedopalem

$$Z_c = \sum Z_{ci} = Z_{cs} + Z_{cpop} + Z_{cú} = 0,0565 + 0,0010 + 0,0023 = 0,0598 [-]$$

(rovnice 4.21.)

$Q_{ci}=32600$ z lit [1], podíly spalitelných tuhých zbytků C_i a X_i z tab. 5.1 a tab. 5.2 z lit.[1]

výpočet dle vzorce :

$$Z_{ci} = \frac{c_i}{1-c_i} \cdot X_i \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot Q_{ci} \quad (\text{rovnice 4.22.})$$

a) Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce

$$Z_{cs} = \frac{0,16}{1 - 0,16} \cdot 0,74 \cdot \frac{0,249}{20250} \cdot 32600$$

$$Z_{cs} = 0,0565 [-]$$

b) Ztráta mechanickým nedopalem v propadu

$$Z_{cpop} = \frac{0,3}{1 - 0,3} \cdot 0,06 \cdot \frac{0,0249}{20250} \cdot 32600$$

$$Z_{cpop} = 0,0010 [-]$$

c) Ztráta nedopalem v úletu

$$Z_{cú} = \frac{0,22}{1 - 0,22} \cdot 0,20 \cdot \frac{0,0249}{20250} \cdot 32600$$

$$Z_{cú} = 0,0023 [-]$$

Ztráta chem. nedopalem

$O_{2ref} = 6\%$ pro uhlí a $mgCO$ z lit. [1]

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot V_{SS}}{(21 - O_{2,ref}) \cdot Q_i} \quad (\text{rovnice 4.23.})$$

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot 400 \cdot 9,7950}{(21 - 0,06) \cdot 20250}$$

$$Z_{CO} = 0,0020 [-]$$

Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

Z_s stanovím dle obr.5.1 strana 66 v [1]

$$Z_s = 0,0070 [-]$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$Z_f = \sum Z_{fi} = Z_{fs} + Z_{fpop} = +,0072 + 0,0007 = 0,0079 [-] \quad (\text{rovnice 4.24.})$$

Dle vzorce:

$$Z_{fi} = \frac{X_i}{1-c_i} \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot c_i \cdot t_i [-] \quad (\text{rovnice 4.25.})$$

a) struska + propad

$$c_s = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_s = 1,0132$$

$$Z_{fs} = \frac{0,74 + 0,06}{1 - 0,16} \cdot \frac{0,0249}{20250} \cdot 1,0132 \cdot 600 [-]$$

$$Z_{fs} = 0,0072 [-]$$

a) popílek v úletu

$$c_{pop} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{pop} = 0,8224$$

$$Z_{fpop} = \frac{0,20}{1 - 0,3} \cdot \frac{0,0249}{20250} \cdot 0,8224 \cdot 220 [-]$$

$$Z_{fpop} = 0,0007 [-]$$

Ztráta komínová

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot V_{SV}^{ts2} \cdot \frac{c_{psp} \cdot (t_{sp} - t_o)}{Q_i} \quad (\text{rovnice 4.26.})$$

$$Z_k = (1 - 0,0598) \cdot 18,8450 \cdot \frac{1,3665 \cdot (220 - 20)}{20250}$$

$$Z_k = 0,2391 [-]$$

4.2.4 Stanovení účinnosti

$$\eta_k = 100 - \sum Z_i = (Z_c + Z_{CO} + Z_s + Z_f + Z_k) \cdot 100 \quad (\text{rovnice 4.27.})$$

$$\eta_k = 100 - (5,98 + 0,20 + 0,70 + 0,79 + 23,91)$$

$$\eta_k = 0,6852 = 68,52 \text{ [\%]}$$

4.2.5 Množství přivedeného paliva

Skutečné množství přivedeného paliva

$$M_{pal} = \frac{Q_{vyr}}{Q_i^r \cdot \eta_k} [kg \cdot s^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.28.})$$

$$M_{pal} = \frac{38892}{20250 \cdot 0,6852}$$

$$M_{pal} = 2,8029 [kg \cdot s^{-1}]$$

Výpočtové množství spáleného paliva

$$M_{pv} = M_{pal} \cdot (1 - Z_c) [kg \cdot s^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.29})$$

$$M_{pv} = 2,8029 \cdot (1 - 0,0598)$$

$$M_{pv} = 2,6352 [kg \cdot s^{-1}]$$

4.3 Výpočty pro dřevní štěpku

4.3.1 Stechiometrické výpočty

Přepočet stavu prvků hořlaviny „h“ na stav surový „r“

$$C^r = C^h \cdot (1 - A^r - W^r) \quad (\text{rovnice 4.30.})$$

$$C^r = 0,5 \cdot (1 - 0,0267 - 0,4253)$$

$$C^r = 27,4 [\%]$$

$$H^r = H^h \cdot (1 - A^r - W^r) \quad (\text{rovnice 4.31.})$$

$$H^r = 0,062 \cdot (1 - 0,0267 - 0,4253)$$

$$H^r = 3,39 [\%]$$

$$N^r = N^h \cdot (1 - A^r - W^r) \quad (\text{rovnice 4.32.})$$

$$N^r = 0,002 \cdot (1 - 0,0267 - 0,4253)$$

$$N^r = 0,11 [\%]$$

$$O^r = O^h \cdot (1 - A^r - W^r) \quad (\text{rovnice 4.33.})$$

$$O^r = 0,436 \cdot (1 - 0,0267 - 0,4253)$$

$$O^r = 23,89 [\%]$$

$$S^r = 0 [\%]$$

Minimální objem kyslíku potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{O_2, \min} = 22,4 \cdot \left(\frac{C^r}{12} + \frac{H^r}{4} + \frac{S^r}{32} - \frac{O^r}{32} \right) \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.34.})$$

$$V_{O_2,min} = 22,4 \cdot \left(\frac{0,274}{12} + \frac{0,0339}{4} + \frac{0}{32} - \frac{0,2389}{32} \right)$$

$$V_{O_2,min} = 0,5340 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{VZS,min} = \frac{V_{O_2,min}}{0,21} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.35.})$$

$$V_{VZS,min} = \frac{0,5340}{0,21}$$

$$V_{VZS,min} = 2,5428 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$V_{VZV,min} = \vartheta \cdot V_{VZS,min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.36.})$$

$$V_{VZV,min} = 1,016 \cdot 2,5428$$

$$V_{VZV,min} = 2,5834 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem vzduchu skutečného suchého

$$V_{VZS} = n \cdot V_{VZS,min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.37.})$$

$$V_{VZS} = 1,8 \cdot 2,5428$$

$$V_{VZS} = 4,5770 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem vzduchu skutečného vlhkého

$$V_{VZV} = n \cdot V_{VZV,min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.38.})$$

$$V_{VZV} = 1,8 \cdot 2,5834$$

$$V_{VZV} = 4,6501 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem oxidu uhličitého

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot C^r [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.39.})$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} \cdot 0,274$$

$$V_{CO_2} = 0,5114 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem oxidu siřičitého

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot S^r [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.40.})$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,4}{32} \cdot 0$$

$$V_{SO_2} = 0 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem dusíku

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot N^r + 0,79 \cdot V_{VZS} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.41.})$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28} \cdot 0,0011 + 0,79 \cdot 4,5770$$

$$V_{N_2} = 3,6167 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem kyslíku

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (n - 1) \cdot V_{VZS,min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.42.})$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (1,8 - 1) \cdot 2,5428$$

$$V_{O_2} = 0,4271 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem suchých spalin

$$V_{SS} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.43.})$$

$$V_{SS} = 0,51146 + 0 + 3,61671 + 0,42719$$

$$V_{SS} = 4,5553 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem vodní páry, ze spalování vodíku, odpařenou vlhkostí paliva a vlhkostí vzduchu

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot H^r + \frac{22,4}{18} \cdot W^r + (\vartheta - 1) \cdot V_{VZS} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.44.})$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot 0,0339 + \frac{22,4}{18} \cdot 0,4253 + (1,016 - 1) \cdot 4,5770$$

$$V_{H_2O} = 0,9821 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Objem vlhkých spalin z 1kg paliva tedy bude

$$V_{SV} = V_{SS} + V_{H_2O} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.45.})$$

$$V_{SV} = 4,5553 + 0,98217$$

$$V_{SV} = 5,5375 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Procentní složení spalin

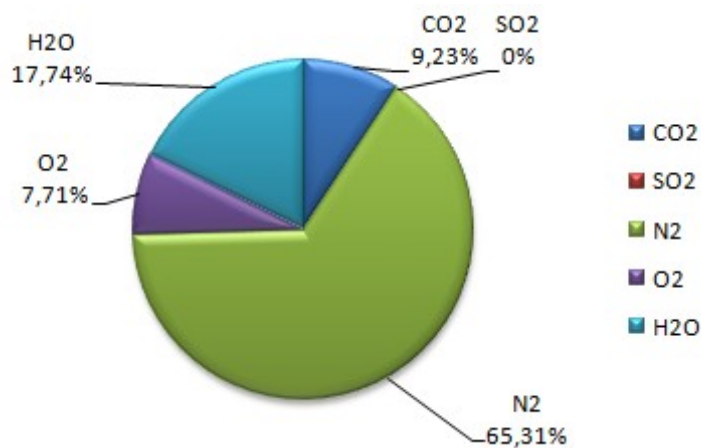
$$\omega_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{0,51146}{5,53753} \cdot 100 = 9,2362[\%] \quad (\text{rovnice 4.46.})$$

$$\omega_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{0}{5,53753} \cdot 100 = 0[\%] \quad (\text{rovnice 4.47.})$$

$$\omega_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{3,61671}{5,53753} \cdot 100 = 65,3126[\%] \quad (\text{rovnice 4.48.})$$

$$\omega_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{0,42719}{5,53753} \cdot 100 = 7,7144[\%] \quad (\text{rovnice 4.49.})$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{SV}} \cdot 100 = \frac{0,98217}{5,53753} \cdot 100 = 17,7366[\%] \quad (\text{rovnice 4.50.})$$



Graf 4-2 Objemové složení spalín u dřevní štěpky

Objem spalín z 1kg paliva při teplotě $t_s=220^\circ\text{C}$ s přebytkem vzduchu $n = 1,8$

$$V_{SV}^{t_s} = V_{SV} \cdot \frac{273,15+t_s}{273,15} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.51.})$$

$$V_{SV}^{t_s} = 5,53753 \cdot \frac{273,15 + 220}{273,15}$$

$$V_{SV}^{t_s} = 9,9975 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

4.3.2 Stanovení měrných tepelných kapacit spalín

K určení měrných tepelných kapacit spalín, jsem použil Tab. 4.9 z literatury [1].

K přesnějšímu výpočtu pro teplotu 220°C jsem použil interpolační metodu.

$$c_{pCO_2} = \frac{1,8626 - 1,7863}{300 - 200} \cdot (220 - 200) + 1,7863 = 1,8015 [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{pSO_2} = \frac{2,0010 - 1,9427}{300 - 200} \cdot (220 - 200) + 1,9427 = 1,9543 [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{pO_2} = \frac{1,3567 - 1,3372}{300 - 200} \cdot (220 - 200) + 1,3372 = 1,3411 [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{pN_2} = \frac{1,3069 - 1,2994}{300 - 200} \cdot (220 - 200) + 1,2994 = 1,3009 [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{pH_2O} = \frac{1,5425 - 1,5227}{300 - 200} \cdot (220 - 200) + 1,5227 = 1,5266 [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$c_{psp} = c_{pCO_2} \cdot \omega_{CO_2} + c_{pSO_2} \cdot \omega_{SO_2} + c_{pO_2} \cdot \omega_{O_2} + c_{pN_2} \cdot \omega_{N_2} + c_{pH_2O} \cdot \omega_{H_2O}$$

(rovnice 4.52.)

$$c_{psp} = 1,8015 \cdot 0,092362 + 1,9543 \cdot 0 + 1,3411 \cdot 0,077144 + 1,3009 \cdot 0,653126 \\ + 1,5266 \cdot 0,177366$$

$$c_{psp} = 1,3902 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

4.3.3 Tepelné ztráty

Ztráta mechanickým nedopalem

Na základě konzultace s vedoucím bakalářské práce byla ztráta mech. nedopalem u dřevní štěpky zvolena :

$$Z_c = 0,05 [-]$$

Ztráta chem. nedopalem

Na základě konzultace s vedoucím bakalářské práce byla ztráta chem. nedopalem u dřevní štěpky zvolena :

$$Z_{co} = 0,001 [-]$$

Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

Zs stanovím dle obr.5.1 strana 66 v [1]

$$Z_s = 0,009 [-]$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Na základě konzultace s vedoucím bakalářské práce byla ztráta fyzickým teplem u dřevní štěpky zvolena :

$$Z_f = 0,005 [-]$$

Ztráta komínová

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot V_{SV}^{ts} \cdot \frac{c_{psp} \cdot (t_{sp} - t_o)}{Q_i} \quad (\text{rovnice 4.53.})$$

$$Z_k = (1 - 0,05) \cdot 9,9975 \cdot \frac{1,3902 \cdot (220 - 20)}{9390}$$

$$Z_k = 0,2812 \quad [-]$$

4.3.4 Stanovení účinnosti

$$\eta_k = 100 - \sum Z_i = (Z_c + Z_{CO} + Z_s + Z_f + Z_k) \cdot 100 \quad (\text{rovnice 4.54.})$$

$$\eta_k = 100 - (5 + 0,1 + 0,9 + 0,5 + 28,12)$$

$$\eta_k = 0,6538 = 65,38 \quad [\%]$$

4.3.5 Množství přivedeného paliva

Skutečné množství přivedeného paliva

$$M_{pal} = \frac{Q_{vyr}}{Q_i^r \cdot \eta_k} [kg \cdot s^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.55.})$$

$$M_{pal} = \frac{38892}{9390 \cdot 0,6538}$$

$$M_{pal} = 6,3350 [kg \cdot s^{-1}]$$

Výpočtové množství spáleného paliva

$$M_{pv} = M_{pal} \cdot (1 - Z_c) [kg \cdot s^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.56})$$

$$M_{pv} = 6,3350 \cdot (1 - 0,05)$$

$$M_{pv} = 6,0182 [kg \cdot s^{-1}]$$

5. Výpočty pro spalování směsí paliv

Tyto výpočty jsou zpracovány na základě literatury [1]. Veličiny pro uhlí mají spodní index 1 a veličiny pro dř. štěpku spodní index 2.

5.1 Výpočet pro směs paliva 80% č. uhlí a 20% dř. štěpky

Změna výhřevnosti

$$Q_{is1}^r = g_1 \cdot Q_{i1}^r + (1 - g_1) \cdot Q_{i2}^r [MJ \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.1.})$$

$$Q_{is1}^r = 0,8 \cdot 20250 + (1 - 0,8) \cdot 9390$$

$$Q_{is1}^r = 18,078 [MJ \cdot kg^{-1}]$$

Změna objemu spalovacího vzduchu vlhkého

$$V_{VZV,s1} = g_1 \cdot V_{VZV1} + (1 - g_1) \cdot V_{VZV2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.2.})$$

$$V_{VZV,s1} = 0,8 \cdot 10,0965 + (1 - 0,8) \cdot 4,6501$$

$$V_{VZV,s1} = 9,0072 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Změna objemu složek spalín

Dle podílového poměru směsi pro jednotlivé objemy

$$V_{i,s1} = 0,8 \cdot V_{i,1} + 0,2 \cdot V_{i,2} \quad (\text{rovnice 5.3.})$$

$$V_{CO_2,s1} = 0,8 \cdot 1,0061 + 0,2 \cdot 0,5114 = 0,9071 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{SO_2,s1} = 0,8 \cdot 0,0047 + 0,2 \cdot 0 = 0,0038 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{N_2,s1} = 0,8 \cdot 7,8566 + 0,2 \cdot 3,6167 = 7,0086 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{O_2,s1} = 0,8 \cdot 0,9275 + 0,2 \cdot 0,4271 = 0,8274 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{H_2O,s1} = 0,8 \cdot 0,6431 + 0,2 \cdot 0,9821 = 0,7109 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Změna objemu spalín vlhkých

$$V_{SV,s1} = g_1 \cdot V_{SV1} + (1 - g_1) \cdot V_{SV2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.4.})$$

$$V_{SV,s1} = 0,8 \cdot 10,4389 + (1 - 0,8) \cdot 5,5375$$

$$V_{SV,s1} = 9,4586 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Změna komínové ztráty

$$Z_{K,s1} = g_1 \cdot Z_{K1} + (1 - g_1) \cdot Z_{K2} \quad (\text{rovnice 5.5.})$$

$$Z_{K,s1} = 0,8 \cdot 23,91 + (1 - 0,8) \cdot 28,12$$

$$Z_{K,s1} = 24,75 [\%]$$

Změna účinnosti

$$\eta_{s1} = g_1 \cdot \eta_1 + (1 - g_1) \cdot \eta_2 \quad (\text{rovnice 5.6.})$$

$$\eta_{s1} = 0,8 \cdot 68,52 + (1 - 0,8) \cdot 65,38$$

$$\eta_{s1} = 68,09 [\%]$$

Změna množství přivedeného paliva

$$M_{pal,s1} = g_1 \cdot M_{pal1} + (1 - g_1) \cdot M_{pal2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.7.})$$

$$M_{pal,s1} = 0,8 \cdot 2,8029 + (1 - 0,8) \cdot 6,3350$$

$$M_{pal,s1} = 3,5093 [kg \cdot s^{-1}]$$

5.2 Výpočet pro směs paliva 70% č. uhlí a 30% dř. štěpky

Změna výhřevnosti

$$Q_{is2}^r = g_1 \cdot Q_{i1}^r + (1 - g_1) \cdot Q_{i2}^r [MJ \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.8.})$$

$$Q_{is2}^r = 0,7 \cdot 20250 + (1 - 0,7) \cdot 9390$$

$$Q_{is2}^r = 16,992 [MJ \cdot kg^{-1}]$$

Změna objemu spalovacího vzduchu vlhkého

$$V_{VZV,s2} = g_1 \cdot V_{VZV1} + (1 - g_1) \cdot V_{VZV2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.9.})$$

$$V_{VZV,s2} = 0,7 \cdot 10,0965 + (1 - 0,7) \cdot 4,6501$$

$$V_{VZV,s2} = 8,4625 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Změna objemu složek spalín

Dle podílového poměru směsi pro jednotlivé objemy

$$V_{i,s2} = 0,7 \cdot V_{i,1} + 0,3 \cdot V_{i,2}$$

$$V_{CO_2,s2} = 0,7 \cdot 1,0061 + 0,3 \cdot 0,5114 = 0,8576 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{SO_2,s2} = 0,7 \cdot 0,0047 + 0,3 \cdot 0 = 0,0032 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{N_2,s2} = 0,7 \cdot 7,8566 + 0,3 \cdot 3,6167 = 6,5846 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{O_2,s2} = 0,7 \cdot 0,9275 + 0,3 \cdot 0,4271 = 0,7773 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{H_2O,s2} = 0,7 \cdot 0,6431 + 0,3 \cdot 0,9821 = 0,7448 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Změna objemu spalín vlhkých

$$V_{SV,s2} = g_1 \cdot V_{SV1} + (1 - g_1) \cdot V_{SV2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.10.})$$

$$V_{SV,s2} = 0,7 \cdot 10,4389 + (1 - 0,7) \cdot 5,5375$$

$$V_{SV,s2} = 8,9684 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Změna komínové ztráty

$$Z_{K,s2} = g_1 \cdot Z_{K1} + (1 - g_1) \cdot Z_{K2} \quad (\text{rovnice 5.11.})$$

$$Z_{K,s2} = 0,7 \cdot 23,91 + (1 - 0,7) \cdot 28,12$$

$$Z_{K,s2} = 25,17[\%]$$

Změna účinnosti

$$\eta_{s2} = g_1 \cdot \eta_1 + (1 - g_1) \cdot \eta_2 \quad (\text{rovnice 5.12.})$$

$$\eta_{s2} = 0,7 \cdot 68,52 + (1 - 0,7) \cdot 65,38$$

$$\eta_{s2} = 67,57[\%]$$

Změna množství přivedeného paliva

$$M_{pal,s2} = g_1 \cdot M_{pal1} + (1 - g_1) \cdot M_{pal2} [kg \cdot s^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.13.})$$

$$M_{pal,s2} = 0,7 \cdot 2,8029 + (1 - 0,7) \cdot 6,3350$$

$$M_{pal,s2} = 3,8625 [kg \cdot s^{-1}]$$

5.3 Výpočet pro směs paliva 60% č. uhlí a 40% dř. štěpky

Změna výhřevnosti

$$Q_{is3}^r = g_1 \cdot Q_{i1}^r + (1 - g_1) \cdot Q_{i2}^r [MJ \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.14.})$$

$$Q_{is3}^r = 0,6 \cdot 20250 + (1 - 0,6) \cdot 9390$$

$$Q_{is3}^r = 15,906 [MJ \cdot kg^{-1}]$$

Změna objemu spalovacího vzduchu vlhkého

$$V_{VZV,s3} = g_1 \cdot V_{VZV1} + (1 - g_1) \cdot V_{VZV2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.15.})$$

$$V_{VZV,s3} = 0,6 \cdot 10,0965 + (1 - 0,6) \cdot 4,6501$$

$$V_{VZV,s3} = 7,9179 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Změna objemu složek spalín

Dle podílového poměru směsi pro jednotlivé objemy

$$V_{i,s3} = 0,6 \cdot V_{i,1} + 0,4 \cdot V_{i,2} \quad (\text{rovnice 5.16.})$$

$$V_{CO_2,s3} = 0,6 \cdot 1,0061 + 0,4 \cdot 0,5114 = 0,8082 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{SO_2,s3} = 0,6 \cdot 0,0047 + 0,4 \cdot 0 = 0,0028 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{N_2,s3} = 0,6 \cdot 7,8566 + 0,4 \cdot 3,6167 = 6,1606 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{O_2,s3} = 0,6 \cdot 0,9275 + 0,4 \cdot 0,4271 = 0,7273 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{H_2O,s3} = 0,6 \cdot 0,6431 + 0,4 \cdot 0,9821 = 0,7787 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Změna objemu spalín vlhkých

$$V_{SV,s3} = g_1 \cdot V_{SV1} + (1 - g_1) \cdot V_{SV2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.17.})$$

$$V_{SV,s3} = 0,6 \cdot 10,4389 + (1 - 0,6) \cdot 5,5375$$

$$V_{SV,s3} = 8,4783 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Změna komínové ztráty

$$Z_{K,s3} = g_1 \cdot Z_{K1} + (1 - g_1) \cdot Z_{K2} \quad (\text{rovnice 5.18.})$$

$$Z_{K,s3} = 0,6 \cdot 23,91 + (1 - 0,6) \cdot 28,12$$

$$Z_{K,s3} = 25,59[\%]$$

Změna účinnosti

$$\eta_{s3} = g_1 \cdot \eta_1 + (1 - g_1) \cdot \eta_2 \quad (\text{rovnice 5.19.})$$

$$\eta_{s3} = 0,6 \cdot 68,52 + (1 - 0,6) \cdot 65,38$$

$$\eta_{s3} = 67,26[\%]$$

Změna množství přivedeného paliva

$$M_{pal,s3} = g_1 \cdot M_{pal1} + (1 - g_1) \cdot M_{pal2} [kg \cdot s^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.20.})$$

$$M_{pal,s3} = 0,6 \cdot 2,8029 + (1 - 0,6) \cdot 6,3350$$

$$M_{pal,s3} = 4,2157[kg \cdot s^{-1}]$$

5.4 Výpočet množství spalovacích vzduchů a množství spalín pro paliva a směsi

Výpočty pro skutečné průtoky spalovacího vzduchu pro jednotlivá paliva a směsi dle vzorce:

$$M_{VZV,i} = V_{VZV,i} \cdot M_{PV,i} [M_N^3 \cdot s^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.21.})$$

$$M_{VZV,uhlí} = 10,0965 \cdot 2,6352 = 26,6063$$

$$M_{VZV,štěpka} = 4,6501 \cdot 6,0182 = 27,9852$$

$$M_{VZV,s1} = 9,0072 \cdot (0,8 \cdot 2,6352 + 0,2 \cdot 6,0182) = 29,8301$$

$$M_{VZV,s2} = 8,4626 \cdot (0,7 \cdot 2,6352 + 0,3 \cdot 6,0182) = 30,8893$$

$$M_{VZV,s3} = 7,9179 \cdot (0,6 \cdot 2,6352 + 0,4 \cdot 6,0182) = 31,5799$$

Výpočty pro skutečné průtoky spalin pro jednotlivá paliva a směsi dle vzorce:

$$M_{SV,i} = V_{SV,i} \cdot M_{PV,i} [M_N^3 \cdot s^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.22.})$$

$$M_{SV,uhlí} = 10,4389 \cdot 2,6352 = 27,5086$$

$$M_{SV,štěpka} = 5,5375 \cdot 6,0182 = 33,3258$$

$$M_{SV,s1} = 9,4586 \cdot (0,8 \cdot 2,6352 + 0,2 \cdot 6,0182) = 31,3251$$

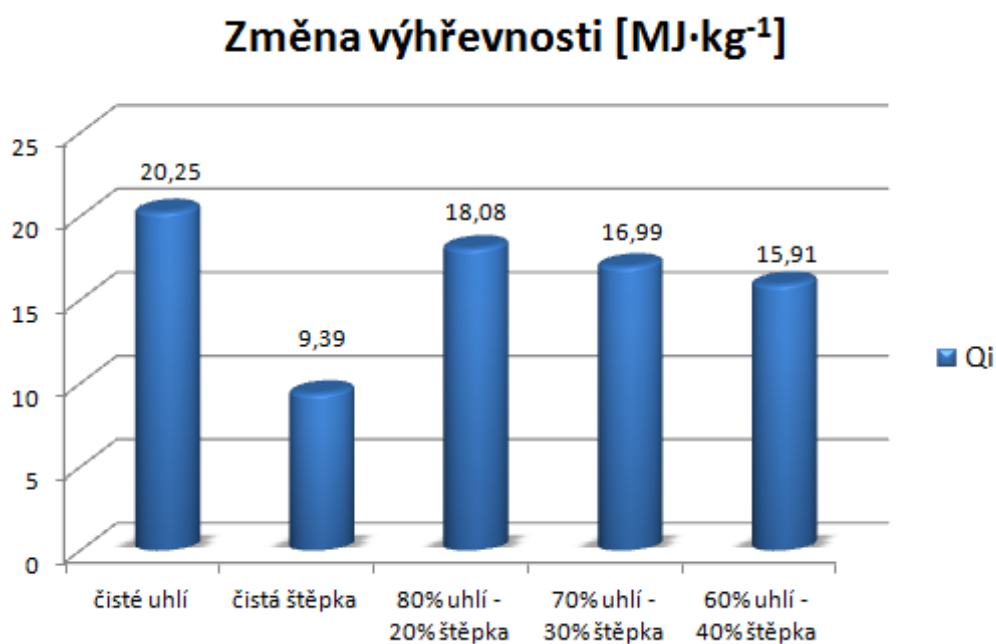
$$M_{SV,s2} = 8,9685 \cdot (0,7 \cdot 2,6352 + 0,3 \cdot 6,0182) = 32,7358$$

$$M_{SV,s3} = 8,4783 \cdot (0,6 \cdot 2,6352 + 0,4 \cdot 6,0182) = 33,8510$$

6. Analýza výsledků

Text v této kapitole je zpracován na základě literatury [4] a [5]

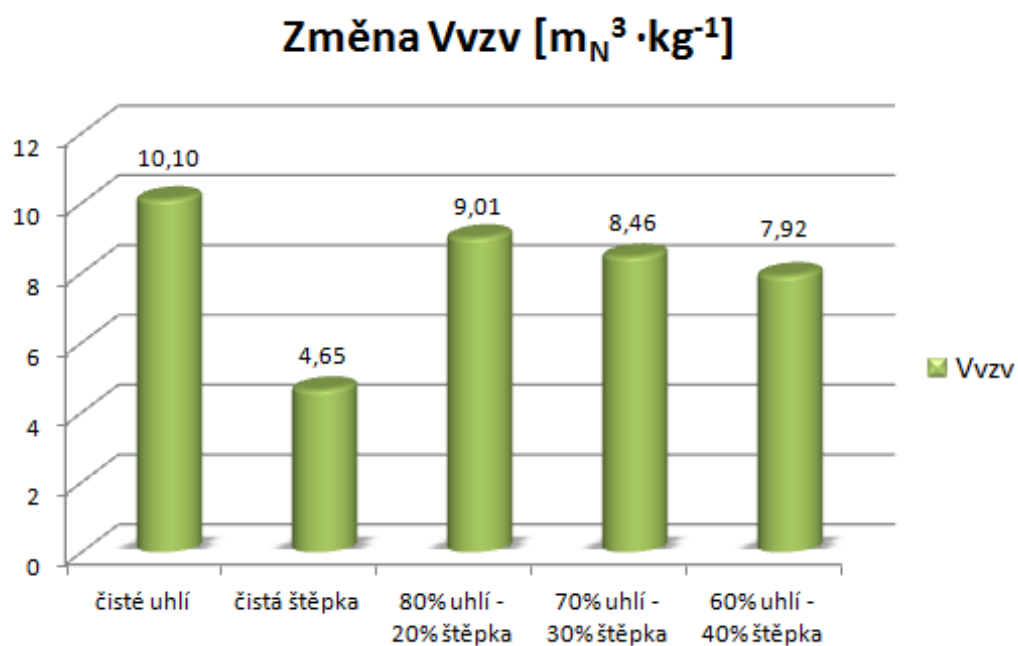
6.1 Porovnání změny výhřevnosti při spalování



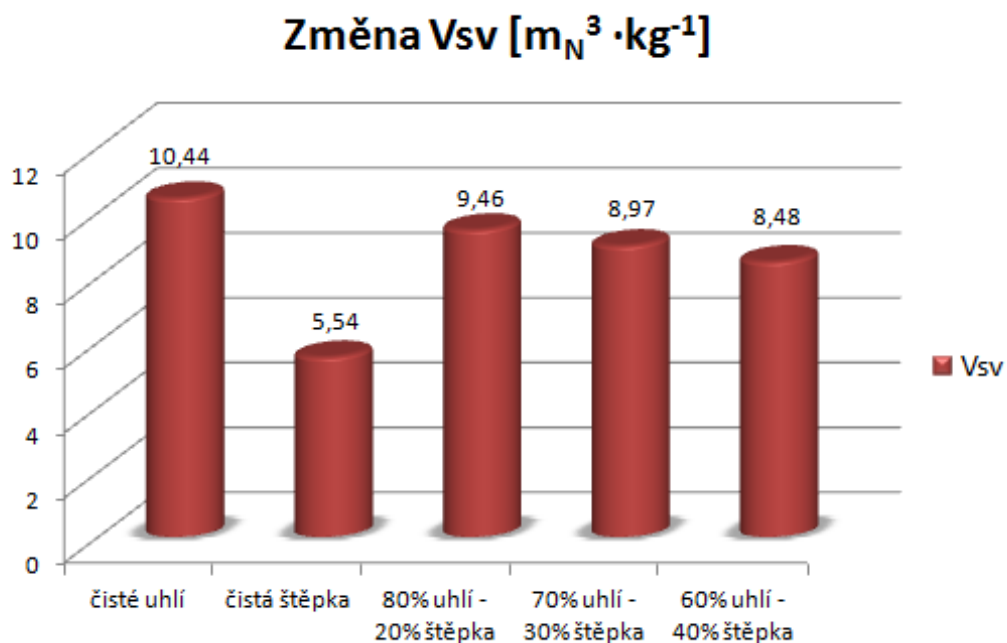
Graf 6-1 Velikost výhřevnosti při spalování č. uhlí a dř. štěpky

Výhřevnost je jedním ze základních palivových znaků kvality a je jedním z faktorů k určení typu kotle, ohniště a dalších částí kotelního zařízení. Dále má vliv na dimenzování zařízení na přípravu paliva, skladování a dopravu paliva. Z výsledků a grafu 6-1 vidíme, že při spalování černého uhlí a dř. štěpky výhřevnost docela výrazně klesá, bude tedy třeba spálit větší množství paliva, to vede k nutnosti zvětšit zásobníky paliva, zvýšit výkony dopravníků aj. Velikost kotelního zařízení se zvětší a zvětší se také vlastní spotřeba el. energie a tím i investiční a provozní náklady.

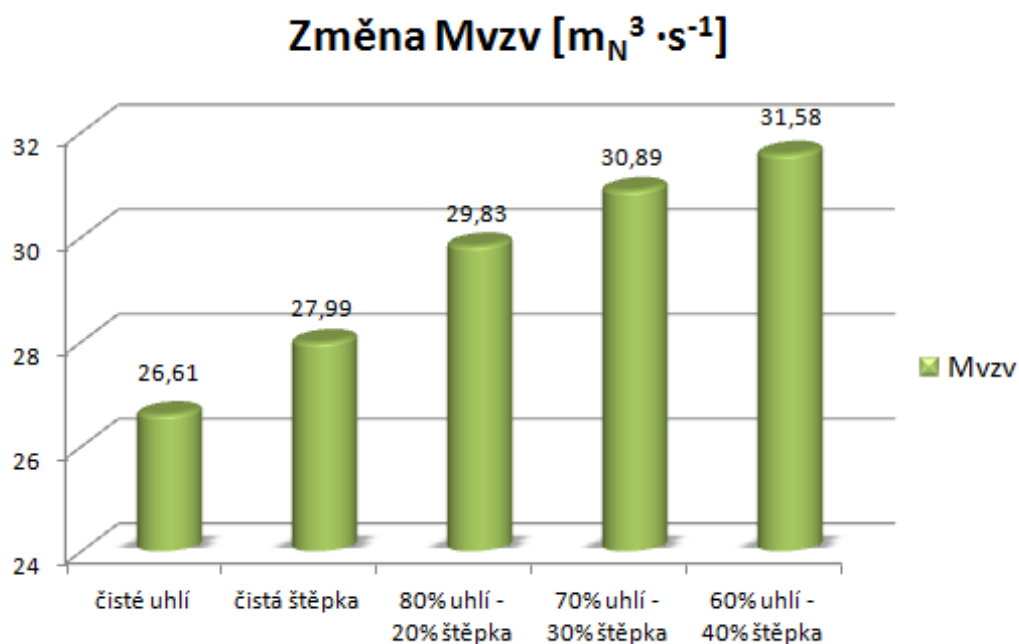
6.2 Porovnání změny objemu spalovacího vzduchu a spalin



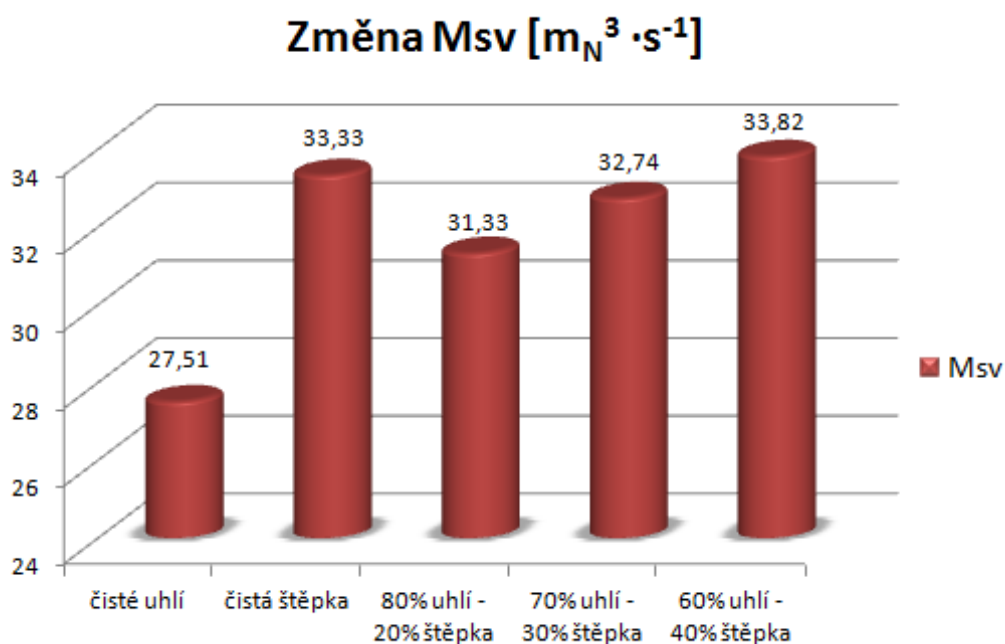
Graf 6-2 Velikost objemu spalovacího vzduchu při spoluspalování č. uhlí a dř. štěpky



Graf 6-3 Velikost objemu spalin při spoluspalování č. uhlí a dř. štěpky



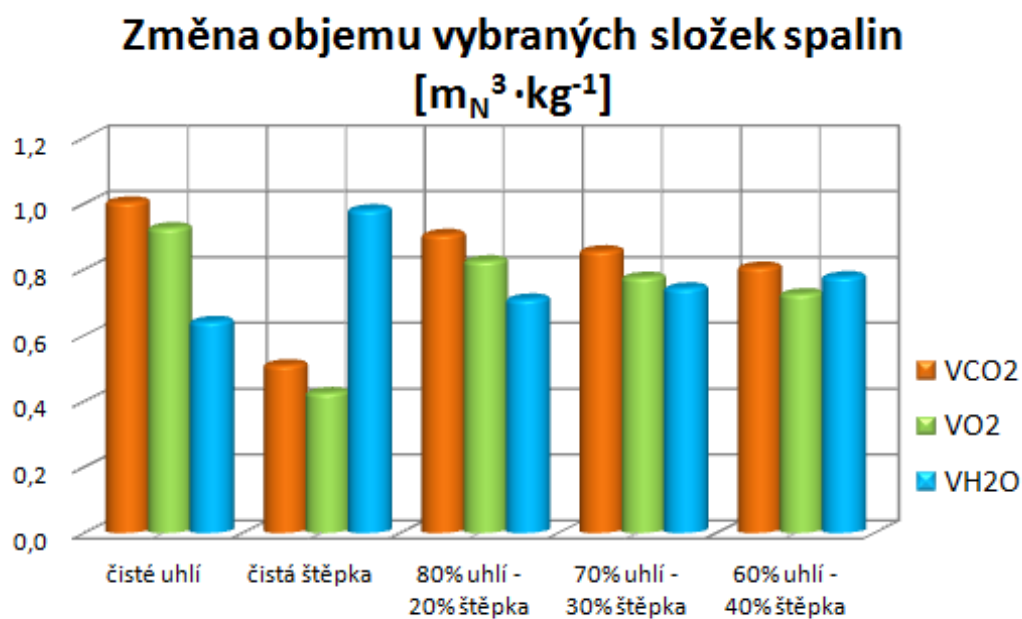
Graf 6-4 Velikost množství spalovacího vzduchu při spoluspalování č. uhlí a dř. štěpky



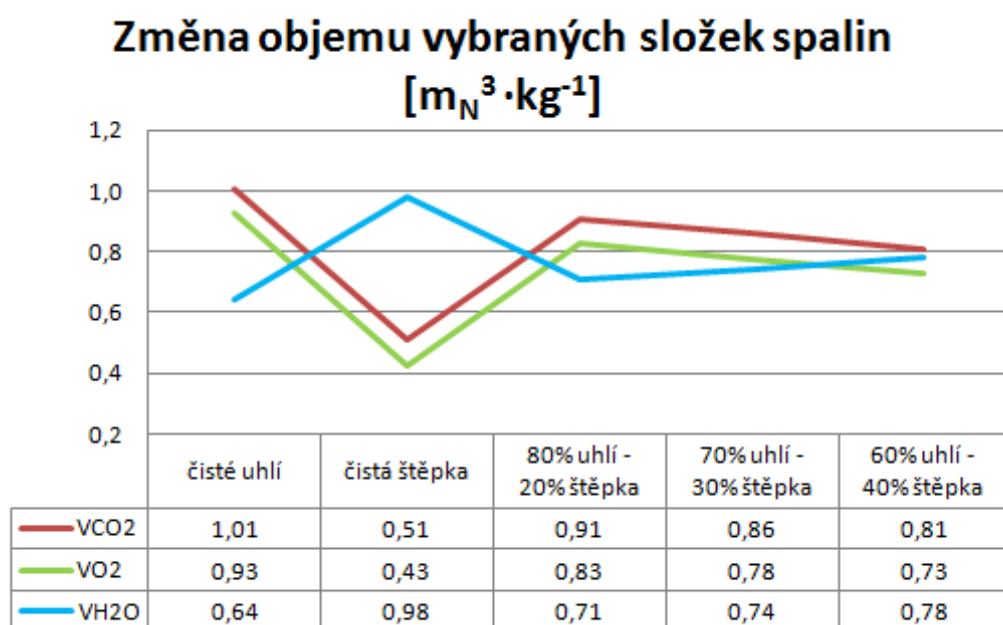
Graf 6-5 Množství spalin při spoluspalování č. uhlí a dř. štěpky

Z grafů 6-4 a 6-5 vidíme, že se objem spalovacího vzduchu a objem spalin u vypočtených spalovacích poměrů prudkým tempem narůstá a je třeba vyměnit ventilátory pro přívod vzduchu a měnit spalinové ventilátory.

6.3 Porovnání změn objemu složek spalín



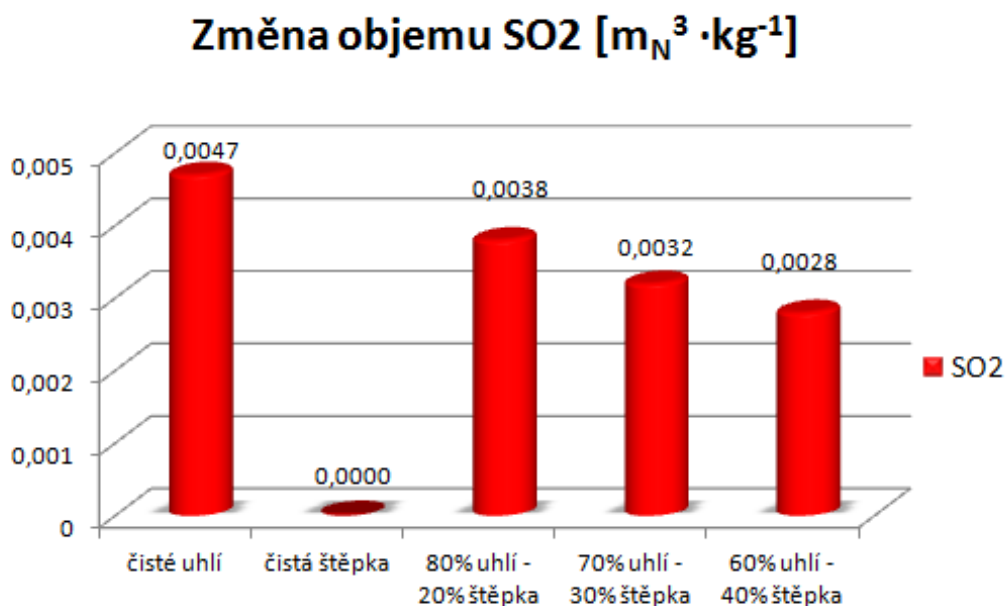
Graf 6-6 Velikost objemu některých složek spalín při spalování č. uhlí a dř. štěpky



Graf 6-7 Velikost objemu některých složek spalín s hodnotami při spalování č. uhlí a dř. štěpky

V grafech (6-4;6-5) vidíme narůstající podíl vodní páry ve spalínách při spoluspalování. Při spalování paliv s větším obsahem vody, tento podíl vodní páry ve spalínách stoupá a to vede k výrazně vyšším komínovým ztrátám, což má jako další následek například snížení účinnosti kotle. Navíc některé složky spalin (SO_2 , SO_3 , HCl a jiné) s vodní párou přítomnou ve spalínách při určité teplotě vytvářejí kyseliny, jejichž páry při ochlazení na nižší teplotu než je jejich rosný bod kondenzují a vzniká tak agresivní kondenzát, který napadá materiály kotle, způsobuje korozi a další nežádoucí účinky.

Dále vidíme, že při spoluspalováním dosáhneme nižších emisí CO_2 . Oxid uhličitý nebýval zařazován mezi škodlivé složky ve spalínách, ale podle některých je původcem skleníkového efektu, proto je snižování CO_2 v současné době nutné. Snižování oxidu uhličitého při spoluspalování přinese především snažší dodržování emisních limitů a tím snížení nákladů na provoz.



Obr. 6-1 Velikost objemu oxidu siřičitého při spoluspalování č. uhlí a dř. štěpky

Síra v uhlí významně ovlivňuje chemické reakce, které za vhodných podmínek probíhají mezi složkami popelovin a teplosměnnou plochou kotle. Úzce souvisí s tvorbou struskových nánosů či popílkových nánosů a s korozí na straně spalin.

Vysokoteplotní koroze – Vyskytuje se především na trubkových stěnách ohniště a v oblasti přehříváku. Příčinou je redukční atmosféra s obsahem CO a H₂ a zvýšeným obsahem nespálených látek. Při větším obsahu chloru při teplotě stěny větší než 450°C, se musí počítat s intenzivní chloridovou korozí

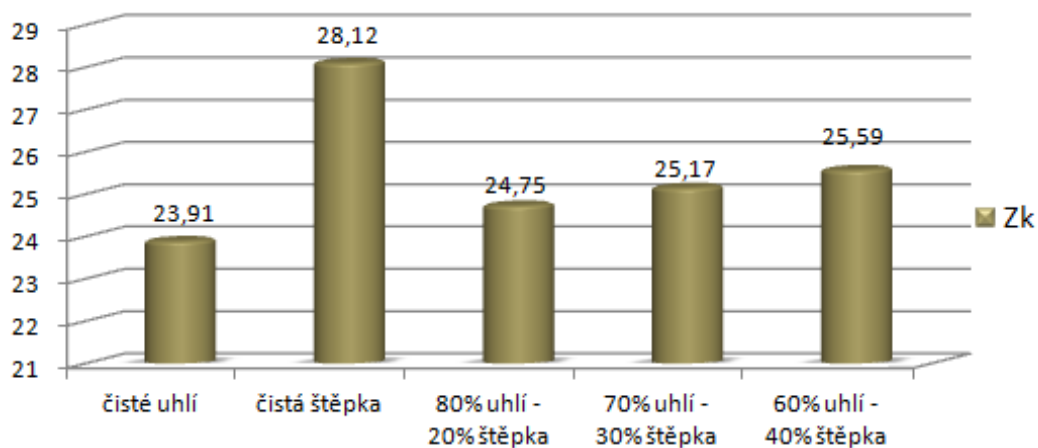
Nízkoteplotní koroze – Vzniká na částech kotle, kde na materiál (teplosměnné plochy, vyzdívky, izolace, oplechování, ocelové konstrukce atd.) mohou působit kondenzující složky spalin. Účinek koroze je závislý na koncentraci složek, zejména SO₃ ve spalinách a na podmínkách provozování, zejména na teplotě, přebytku vzduchu a vlastnostech popílku ve spalinách. Při spalování uhlí je nízkoteplotní koroze zcela běžným jevem (zejména při najíždění nebo odstavení kotle). Při konstrukci kotle můžeme pracovat buď na odstranění příčin koroze, nebo na omezení jejího účinku.

Dřevní štěpka neobsahuje síru a má velmi málo popele. Nulový obsah síry je pro nás velmi příznivý z důvodu životního prostředí a také se díky absenci SO₂ a SO₃ snižuje rosný bod spalin. Je třeba však brát v potaz obsah chloru a neklesnout tedy pod rosný bod chloru a zabránit tím chlorovým korozím. Jak tedy vidíme v grafu 6-6, při spoluspalování směsi č. uhlí s dřevní štěpkou, klesá objem oxidu siřičitého ve spalinách a to můžeme s výhodou využít pro snížení rosného bodu spalin, tzn. že můžeme snížit teplotu za kotlem a tak zvýšit účinnost kotle. Snížení SO₂ nám také pomůže k dodržování emisních limitů.

Chlor - Vliv chloru na korozi teplosměnných ploch kotle je znám především u zařízení na spalování odpadů. U roštových kotlů může působit podobné škody. Při spoluspalování černého uhlí s dřevní štěpkou se chlorové koroze nemusíme příliš obávat, protože dřevní štěpka obsahuje menší množství chloru (v tomto případě 0,02%), na rozdíl od např. slámovitých druhů biomasy.

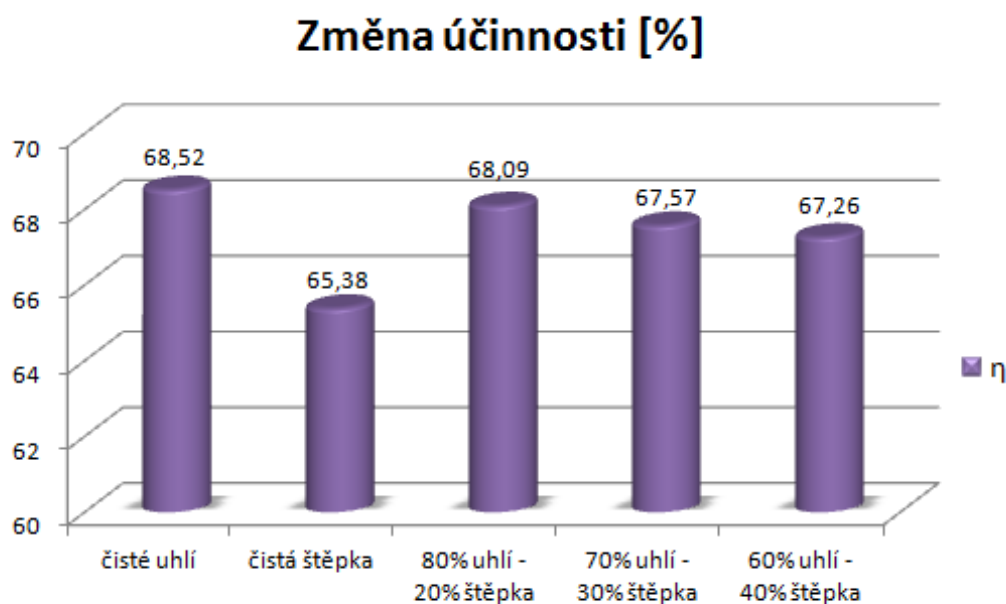
6.4 Porovnání změny komínové ztráty a účinnosti

Změna komínové ztráty [%]



Graf 6-8 Velikost jednotlivých komínových ztrát při spalování

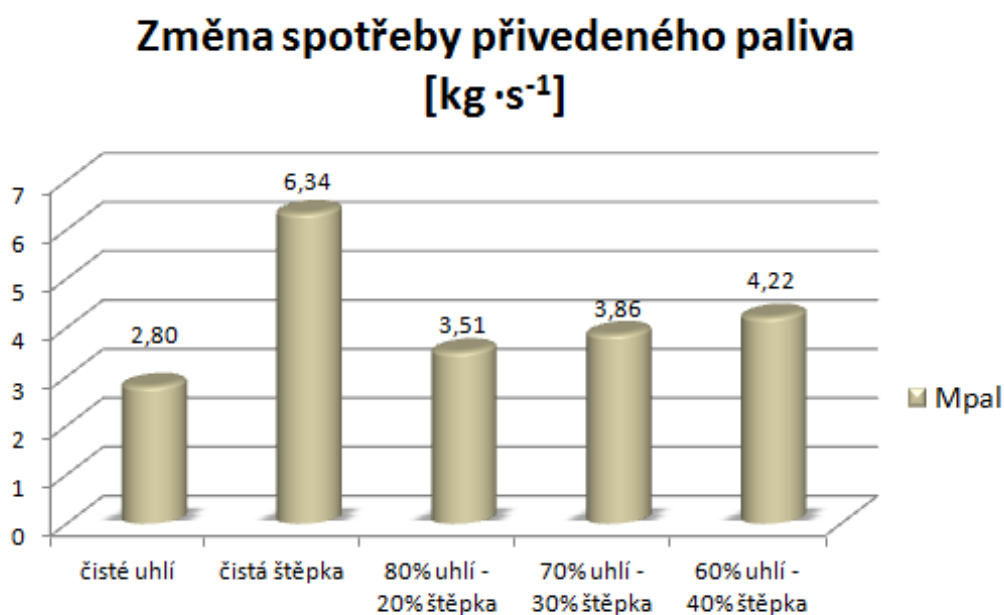
Komínová ztráta uvádí, kolik tepla vzniklého při spálení paliva zmaříme odvodem spalin do ovzduší. Jedná se o největší tepelnou ztrátu kotle a výrazně ovlivňuje účinnost kotle. V grafu 6-6 vidíme, že se při spalování směsi č. uhlí s dř. štěpkou výrazně zvětšuje a tepelné ztráty se hodně zvětší. To můžeme zmírnit vhodnou konstrukcí kotelního zařízení a optimalizací spalovacího procesu.



Graf 6-9 Velikost jednotlivých účinností při spalování

V grafu 6-7 vidíme, že účinnost se při spalování snižuje, to samozřejmě není vyhledávaná vlastnost takového spalování, ale ostatní příznivé vlivy (dostupnost paliva, cena, emise, ekologie..) vykryjí takovéto snížení účinnosti.

6.5 Porovnání spotřeby přivedeného paliva



Graf 6-10 Velikosti jednotlivých spotřeb přivedeného paliva

V grafu 6-8 vidíme, že při spalování počítaných směsí narůstá výrazně spotřeba paliva. Jak již bylo uvedeno, to má vliv na velikosti zařízení pro dopravu, skladování a přípravu paliva. Dř. štěpka jakožto lokální zdroj má své ekonomické limity v dojezdové vzdálenosti pro svoz paliva.

Výsledky výpočtů	černé uhlí	dřevní štěpka	80% č. uhlí - 20% dř. Štěpka	70% č. uhlí - 30% dř. Štěpka	60% č. uhlí - 40% dř. Štěpka
$Q_i [MJ \cdot kg^{-1}]$	20,25	9,39	18,10	16,99	15,9
$V_{vzv} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	10,0965	4,6501	9,0072	8,4626	7,9179
$V_{sv} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	10,4389	5,5375	9,4586	8,9685	8,4783
$V_{CO_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	1,0061	0,5114	0,9072	0,8577	0,8082
$V_{SO_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	0,0047	0	0,0038	0,0033	0,0028
$V_{N_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	7,8575	3,6167	7,0093	6,5853	6,1612
$V_{O_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	0,9275	0,4271	0,8274	0,7774	0,7273
$V_{H_2O} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	0,6431	0,9821	0,7109	0,7448	0,7787
$Z_k [\%]$	23,91	28,12	24,75	25,17	25,59
$\eta [-]$	68,52	65,38	67,89	67,58	67,26
$M_{pal} [kg \cdot s^{-1}]$	2,8029	6,3350	3,5093	3,8625	4,2157
$M_{VZV} [M_N^3 \cdot s^{-1}]$	26,6063	27,9852	29,8301	28,0264	26,2226
$M_{SV} [M_N^3 \cdot s^{-1}]$	27,5086	33,3258	31,3251	29,7018	28,0786

Tab. 6-1 Tabulka výsledků. Q_i – výhřevnost, V_{vzv} – objem spalovacího vzduchu, V_{sv} – objem vlhkých spalin, $V_{CO_2, SO_2, N_2, O_2, H_2O}$ – objemy složek spalin, Z_k – komínová ztráta, η – účinnost, M_{pal} – množství přivedeného paliva, M_{VZV} – množství spalovacího vzduchu, M_{SV} – množství spalin

7. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat vlivy a dopady spalování černého uhlí s dřevní štěpkou. Po stechiometrických výpočtech pro uhlí a následně pro štěpku, jsem získal výsledky několika sledovaných charakteristik, kdy jsem se při porovnávání spalování zaměřil na několik důležitých jako je výhřevnost, objem spalovacího vzduchu, objem vlhkých spalin, objem oxidu siřičitého, objem oxidu uhličitého, komínové ztráty, účinnosti a spotřebovaného paliva.

Z výpočtů vyplývá, že výhřevnost směsi při zvyšujícím se podílu dřevní štěpky výrazně klesá, množství spalovacího vzduchu a spalin docela prudkým tempem narůstá, tím pádem musíme zařadit více ventilátorů, či zvětšit jejich výkony, výrazně klesají emise spalin CO_2 a SO_2 , což znamená významně nižší dopad na ekologii a snadnější plnění emisních limitů. Při zvětšování podílu dř. štěpky, díky její nízké výhřevnosti ovšem rychle stoupá komínová ztráta, která má pak výrazný vliv na snižování účinnosti provozu, což bez nutných technologických opatření nijak neovlivníme. Dále velice výrazně narostla spotřeba paliva, což má za následek zvětšení skladovacích a dopravních zařízení kotelního objektu, což sebou nese vyšší investiční náklady.

Celkový přehled výsledků pro jednotlivá paliva a jejich směsi je uveden v Tab. 6-1.

Spalování či samostatné spalování biomasy, konkrétně dř. štěpky, je v dnešní době velice populárním řešením v energetice, a to díky státní dotační politice, cenám paliv, nižším dopadem na životní prostředí a dostupností paliva. Spaluje se jak na roštových kotlích, tak na fluidních, kdy např. společnost ČEZ několik svých menších energetických provozoven u nás upravila na spalování biomasy, především dřevní štěpky (EHO Hodonín), za účelem snížení emisí a snížení uhelné závislosti. Spalování biomasy také výrazně podporuje domácí zemědělský průmysl a zaměstnanost, tím, že zvětšují plochy, kde jsou pěstované tzv. energetické plodiny a vznikají závody na zpracování dřevní hmoty. Nesmíme však zapomínat na racionální využívání těchto tuzemských zdrojů, jako například nepřekrývat radiusy pro svoz paliva pro více provozů, nebrancovat naše přírodní zdroje a nechat jim čas i na regeneraci a nepěstovat energetické plodiny na úkor potravin atd.

Seznam použité literatury

[1] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Praha : ČVUT, 2007. 212 s.

[2] <http://www.fs.vsb.cz/euprojekty/414/parni-kotle.pdf>

[3] Kadlec, Z. *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty*, Ostrava 2009

[4] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů I*. Ostrava : VŠB-TU, 2002. 116 s.

[5] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů II*. Ostrava : VŠB-TU, 1999. 151 s.

[6] <http://www.heizomat.cz/>

[7] <http://www.eis.cz/problematika.php?klic=3/4/>

[8] <http://www.energotis.cz/olomouc.htm>